Bonn. zool. Beitr.	Jg. 37	H. 2	S. 91—98	Bonn, Juni 1986

Die Träger der remanenten Magnetisierung in Teilen von *Clethrionomys*, *Pitymys* und *Mus* (Rodentia)

von

Klaus Krumsiek & Ernst von Lehmann

Teil I (K. Krumsiek)

Die Eigenschaft der magnetischen Minerale, unter bestimmten Bedingungen die Richtung des Erdmagnetfeldes über geologische Zeiträume konservieren zu können, erlaubt es einerseits wegen der strengen Beziehung zwischen Inklination der Feldlinien und der geographischen Breite die Driftgeschichte von Kontinenten zu rekonstruieren und andererseits die häufigen Polaritätswechsel des Erdmagnetfeldes als Zeitmarken zur Korrelation von fossilfreien Schichtenfolgen zu nutzen.

Verwundert waren die Paläomagnetiker jedoch, daß sich ihre Methode auch an Tiefseesedimenten anwenden ließ, in denen man wegen der großen Entfernung von Liefergebieten, wie Kontinenten oder vulkanisch aktiven ozeanischen Rücken, keine magnetischen Minerale vermutet hatte. Zudem war man erstaunt, daß die Magnetite ($FeFe_2O_4$) nur in Korngrößen zwischen 0,1 μ und 1,4 μ somit in der Einbereichskonfiguration auftraten. Einbereichspartikel sind, nachdem sie sich während der Sedimentation in Richtung des Erdfeldes eingeregelt haben, besonders geeignet, dieses über geologische Zeiträume hinweg zu überliefern.

Als sich die von Lowenstam bereits im Jahre 1962 geäußerte Vermutung über die biogene Entstehung dieser Magnetite zu Beginn der 80iger Jahre erhärtete (z. B. Blakemore et al. 1980), war eine befriedigende Erklärung sowohl für die außergewöhnliche Verbreitung des Magnetits in Tiefseesedimenten als auch für sein enges Korngrößenspektrum gefunden. Konsequenterweise mußte sich auch eine fruchtbare Zusammenarbeit zwischen Biologen, die nach einem magnetischen Orientierungsorgan suchten, und Gesteinsmagnetikern entwickeln, die bereits über entsprechende experimentelle Methoden zum Nachweis auch kleinster Anteile an magnetischen Mineralen verfügten (z. B. Zoeger et al. 1981).

Von den in der Gesteinsmagnetik üblichen Methoden sind Entmagnetisierungsversuche im Wechselfeld zur Erfassung des Koerzitivfeldstärkespektrums und Aufmagnetisierungsversuche zur Messung der Sättigungsmagnetisierung zur Untersuchung der magnetischen Eigenschaften organischer Gewebe besonders relevant. Als Koerzitivfeldstärke werden jene Felder bezeichnet, die zur Eliminierung bzw. Umpolung der magnetischen Momente von Erzkörnern erforderlich sind. Sie sind für magnetische Minerale in Einbereichskonfiguration am

größten und nehmen mit Anzahl der Bereiche bei Körnern in Mehrbereichskonfiguration ab. Sie sind mineralspezifisch und zwar groß für Hämatit und Fe-Hydroxid und vergleichsweise klein für Magnetit (~ 90 mT (Millitesla); Stärke des Erdmagnetfeldes in Köln/Bonn zum Vergleich: 0.046 mT) (Tab. 1).

Dementsprechend sind die Gleichfelder, die notwendig sind, um die magnetischen Momente der Erzkörner einer Probe parallel auszurichten und somit die maximale Magnetisierung, die sog. Sättigungsmagnetisierung, zu messen, für Hämatit und Fe-Hydroxid ebenfalls groß und für Magnetit ebenfalls klein. So wird die Sättigungsmagnetisierung von Hämatit unter Gleichfeldern von 1 T (Tesla) nicht erreicht. Die entsprechenden Kurven werden Remanenzerwerbskurven und die erworbene Remanenz isothermale Remanenz (IRM) genannt, da die Temperatur während der Versuche konstant ist (Tab. 1).

Tabelle 1: Die Abhängigkeit der zeitlichen Stabilität der remanenten Magnetisierung von der mineralspezifischen Bereichskonfiguration sowie die zur Entmagnetisierung notwendigen Curie-Temperaturen und Koerzitivfeldstärken. Die Daten stammen von verschiedenen Autoren (aus Krumsiek 1980).

	Magnetit	Hämatit	Goethit
Superparamagnetischer Zustand	< 0,03 μ	< 0,1 μ	
		< 0,5 μ	
Hohe zeitliche Stabilität	0,1—1 μ	< 10 μ	
als Einbereichs- bzw.	< 1,4 μ	< 100 μ	
Pseudoeinbereichspartikel		< 150 μ	
Abnehmende zeitliche Stabilität	> 17 μ	> 1500 μ	
mit Zunahme der Bereichszahl			
Curie-Temperatur	578°	675°	120°
Koerzitivfeldstärke	960		
	3000 (theor.)	~ 10 000	

IRM-Versuche sind für organisches Material besonders geeignet, da die äußerst schwache Magnetisierung ansteigt und besser meßbar wird. Untersuchungen im Tieftemperaturbereich gehören zwar nicht zur gesteinsmagnetischen Routine, geben aber Aufschluß über den unter Umständen physiologisch wichtigen Anteil an superparamagnetischen Magnetitkristallen. Superparamagnetisch ist Magnetit in Korngrößen < 0.03 μ; in diesem Zustand passen sich die magnetischen Momente jeder äußeren Feldänderung an.

Magnetit in Einbereichsgröße wurde inzwischen bei Kleinsäugern, Hominiden, Delphinen, Tauben, Honigbienen, Chiten und Bakterien nachgewiesen (Mather & Baker 1981; Baker et al. 1983; Zoeger et al. 1981; Blakemore et al. 1980; Walcott et al. 1979). Bei Chiten sind sie in die Zähne eingelagert und kommen als Orientierungshilfe nicht in Frage, in den magnetotaktischen Bakterien sind sie zu Magnetnadeln zusammengekettet und dienen nachweislich als Kompaß (Blakemore et al. 1980). Hohe superparamagnetische Anteile treten beson-

ders bei Tauben und Honigbienen auf (Walcott et al. 1979). Großer, mit bloßem Auge erkennbarer und somit in Mehrbereichskonfiguration vorliegender Magnetit wurde bei Delphinen gefunden (Zoeger et al. 1981).

Als physiologisch erfaßbar und neurologisch übertragbar wird das magnetische Drehmoment gehalten, das von den Einbereichsmagnetiten ausgeübt wird, sobald ihr magnetisches Moment nicht parallel zum Magnetfeld der Erde ausgerichtet ist und mit wachsender Winkelabweichung zunimmt (Walcott et al., 1979).

Superparamagnetischer Magnetit wird als Dauerkompaß betrachtet, da sein magnetisches Moment ständig parallel zum Erdfeld bleibt und nicht den Bewegungen des Individuums folgt (Walcott et al. 1979). Der Mehrbereichsmagnetit der Delphine schließlich könnte als Induktionsspule dienen, deren Induktion am größten ist, wenn sich das Tier parallel zu den Feldlinien des Erdmagnetfeldes bewegt und Null beträgt, wenn das Tier in der magnetischen E-W-Richtung schwimmt (Walcott et al. 1979).

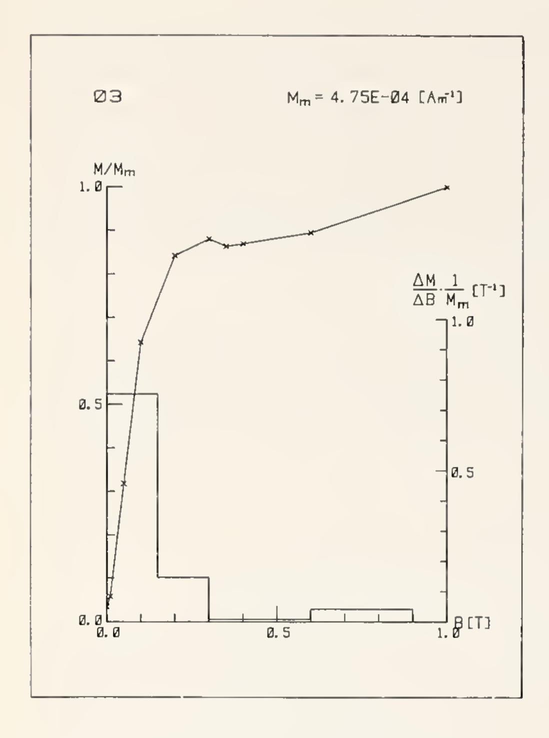
In der vorliegenden Arbeit wird indessen keine Lösung des Fragenkomplexes nach einem „Magnetorezeptor" angestrebt, sondern lediglich 25 Remanenzerwerbskurven und eine Entmagnetisierungskurve vorgestellt, die an in Paraffin eingegossenen Skelett-Teilen von Rötelmaus, Kurzohrmaus und Hausmaus gemessen wurden. Die Arbeiten führte freundlicherweise Herr W. Gruber am Paläomagnetischen Labor der ETH-Zürich durch, wo ein hochempfindliches Kryogenmagnetometer zur Verfügung steht und im Routinebetrieb Gleichfelder zum Aufmagnetisieren bis zur Höhe von 1 T (Tesla) und Entmagnetisierungsfelder bis zur Höhe von 80 mT erzeugt werden können.

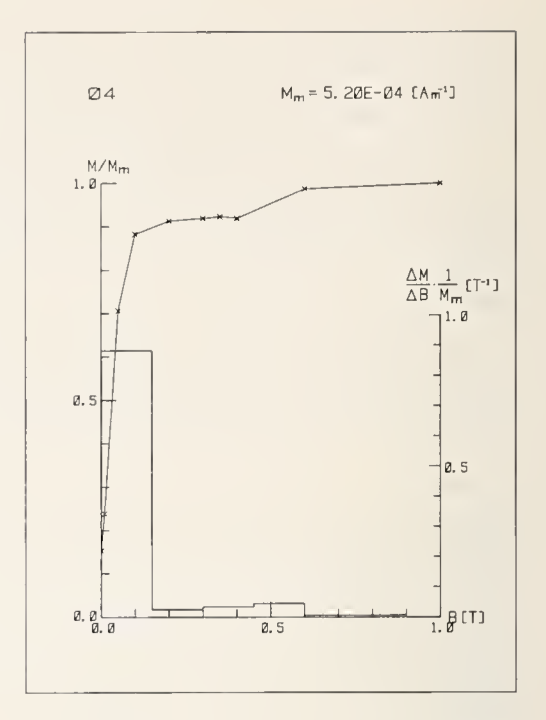
Bis auf die Proben 3, 12, 16 und 18 wird die Sättigungsmagnetisierung schon nach Feldstärken von 0.1 T bis 0.2 T erreicht, mit zunehmender Feldstärke wird keine weitere Remanenz mehr erworben, der horizontale Kurvenverlauf weist Magnetit als Remanenzträger aus (Abb. 1, Proben A, D und 4).

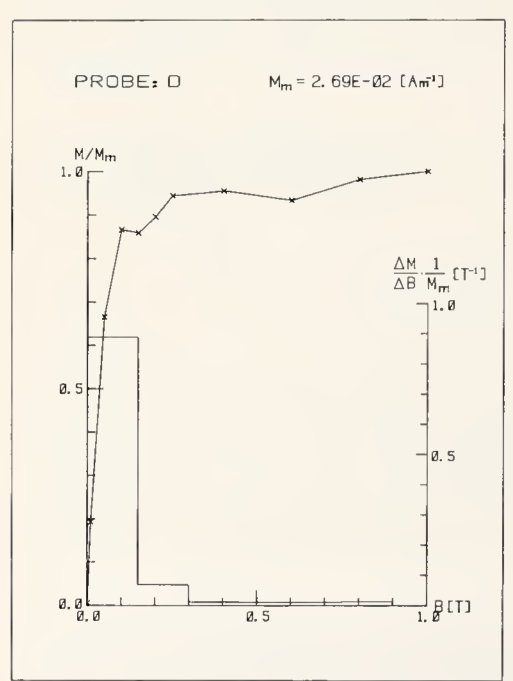
Die Proben 3, 12 und 16 nehmen ebenfalls rasch Remanenzen an, beginnen aber ab 0.2 T bis 0.4 T zu verflachen, ohne bis zur maximal angelegten Feldstärke von 1 T die Sättigung anzuzeigen. Ein solcher Kurvenverlauf weist auf das gemeinsame Auftreten von Hämatit und Magnetit hin (Abb. 1, Probe 3). Etwas aus diesem Rahmen fällt die Probe 18, da sie, wie für Magnetit typisch, unter relativ kleinen Gleichfeldern eine hohe Remanenz gewinnt, bis zu 0.5 T sogar Sättigung vermuten läßt, um dann aber erneut anzusteigen. Dieser Kurvenverlauf läßt sich mit der Anwesenheit eines relativ geringen Anteils an Hämatit erklären.

Da Probe 18 (Abb. 3) aus Hirngewebe von Maus II besteht, kann keine Abhängigkeit der Hämatitverteilung von bestimmten Schädelbereichen festgestellt werden. Auch die Beträge der maximalen Magnetisierung (Mm) zwischen 2.31×10^{-4} Am^{-1} und 7.27×10^{-4} Am^{-1} für die Rötelmaus I und II zeigen weder Orts- noch Individuenabhängigkeit.

Die entsprechenden Intensitäten (Mm) liegen bei den *Pitymys*-Proben B und C, und *Mus musculus* Probe A jedoch um Faktor 10 und bei Probe D (*Pitymys*) sogar um Faktor 100 höher als bei den Rötelmaus-Proben. Auch wird bei den







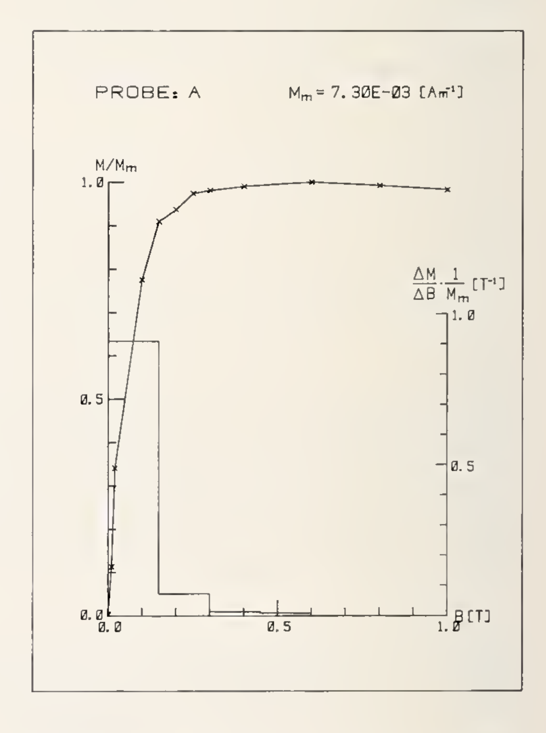


Abb. 1: IRM-Erwerbskurven der Proben von *Clethrionomys* (Proben 3 und 4), *Pitymys* (Probe D) und *Mus* (Probe A). Die Remanenzen (M) auf die maximal erworbene Remanenz (Mm) normiert. Das Histogramm zeigt den Remanenzerwerb (M) pro Feldstärkenerhöhung (B) um jeweils 0.05 T, ebenfalls auf die maximal erworbene Remanenz (Mm) normiert.

an *Pitymys* und *Mus musculus* gemessenen IRM-Kurven der für Magnetit typische Kurvenverlauf besonders deutlich (Abb. 1, Proben A und D). Auch die Entmagnetisierung der von Probe A erworbenen Remanenz weist eindeutig auf Magnetit hin (Abb. 2).

Für die Gewinnung physiologisch relevanter Daten erscheint es sinnvoll, Untersuchungen, wie sie hier vorgestellt werden, mit Niedrigtemperaturversuchen zu kombinieren, um den Anteil an supraleitfähigen Magnetiten zu erfassen und um elektronenrastermikroskopische Aufnahmen zu ergänzen, auf denen die Magnetite zu lokalisieren sind.

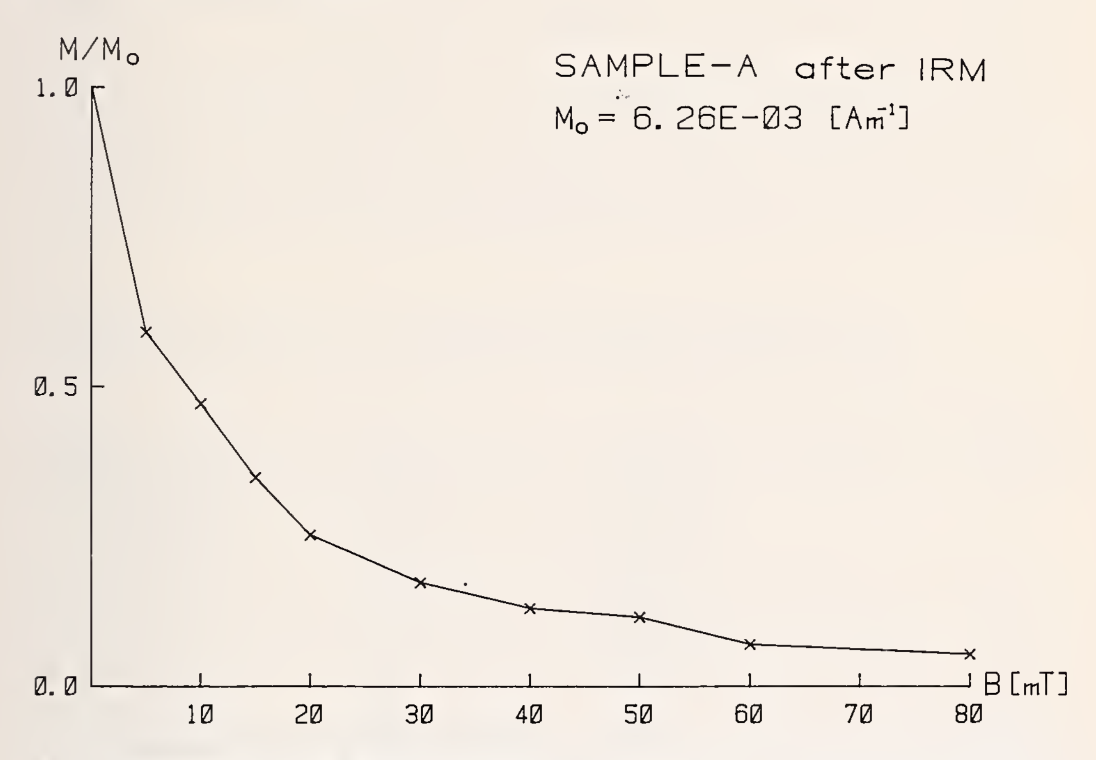


Abb. 2: Die Kurve zeigt die Entmagnetisierung der von Probe A (*Mus*) erworbenen Remanenz. Die Remanenzen (M) sind auf die Remanenz vor Beginn des Versuchs (Mo) normiert.

Teil II (E. von Lehmann)

Die im Teil I der Arbeit besprochenen Kleinsäuger stammen aus dem Bonner Raum (Rötelmaus), aus Sorencino im Tessin (*Pitymys multiplex*), und die Hausmaus ist eine F_1 (Kreuzung) von zwei Zuchtstämmen des Genetischen Instituts in Köln. Die Proben für die Bearbeitung des Materials in Zürich wurden von Herrn Dr. A. Radbruch (Genetisches Institut der Univ. Köln) dankenswerterweise hergestellt (s. Tabelle 2). Bei der ersten Sendung wurden Schädel und Knochenteile eines Tieres, mit verchromtem Besteck in Paraffin eingegossen (Zylinder von 1,5 cm Höhe, 1,5 cm Durchmesser), in Plastikröhrchen verschickt. Bei den Sendungen 2 und 3 wurden die Teile, in Plastikpetrischalen mit Plastikstößel zerkleinert, in Eppendorfröhrchen verschickt.

Das Ziel dieser Arbeit war, zu klären, ob und wieweit ein Zusammenhang besteht zwischen der Ablagerung von Magnetit in den verschiedenen Skelett- und Organteilen einiger Kleinsäugerarten, die bisher daraufhin noch nicht untersucht worden waren, und der Fähigkeit, sich im Gelände zurechtzufinden, d. h. zu navigieren.

In den Jahren 1954 bis 1955 habe ich in der Voreifel größere Heimfindeversuche, vor allem mit Wald-, Gelbhals- und Rötelmäusen vorgenommen (1956), und bei der Auswertung der Ergebnisse beim Verfrachten der ca. 200 Tiere von ihrem Fangplatz im Gelände in verschiedener Entfernung und Richtung blieben natürlich noch Fragen bestehen. Mnemotaktik, Richtungsdressur und „Zurückverfolgen der Verfrachtungsspur" reichten in meiner Untersuchung als Erklärung nicht aus. Dagegen konnte festgestellt werden, daß die freigelassenen Tiere zunächst in alle Richtungen flüchteten oder sich langsam fortbewegten, später aber dann bestimmte Leitlinien (Raine, Furchen, Waldränder, Wiesenwege) benutzten und auf diese Weise wahrscheinlich auf die bekannte Umgebung stießen (1956, p. 489). Diese entscheidende Hilfe beim ersten Abschnitt des Zurück-

Tabelle 2: Beschreibung der untersuchten Proben und Angabe der nachgewiesenen Minerale Magnetit (Mag) und Hämatit (Häma) sowie der maximal erworbenen Remanenz (Mm).

Probe	Maus-Nr.	Gewebe	Mineral	Mm
1	I	Unterkiefer	Mag	5.09 E-04 (Am^{-1})
2	I	Hirn	Mag	4.65 E-04
3	I	Schädelplatte	Häma + Mag	4.75 E-04
4	I	Nase	Mag	5.20 E-04
5	I	Schädel	Mag	5.61 E-04
6	II	Unterkiefer	?	— —
7	II	Nase	Mag	3.72 E-04
8	II	Nase	Mag	3.09 E-04
9	II	Nase	Mag	5.72 E-04
10	II	Hirn	Mag	4.57 E-04
11	II	Hirn	Mag	4.25 E-04
12	II	Unterkiefer	Häma + Mag	4.51 E-04
13	II	Schädeldach	Mag	4.91 E-04
14	II	Schädeldach	Mag	5.00 E-04
15	II	Schädeldach	Mag	4.46 E-04
16	II	Frontschädel	Häma + Mag	3.91 E-04
17	II	Hirn	Mag +	4.38 E-04
18	II	Hirn	Mag + Häma	7.27 E-04
19	I	Hirn	Mag	3.13 E-04
20	I	Hirn	Mag	2.31 E-04
21	I	Hirn	Mag	3.02 E-04
A	*Mus*	Rippe	Mag	7.30 E-03
B	*Pitymys*	Hinterbein v. Balg	Mag	4.90 E-03
C	*Pitymys*	Unterkiefer	Mag	3.40 E-03
D	*Pitymys*	Oberkiefer u. Schädel	Mag	2.69 E-02

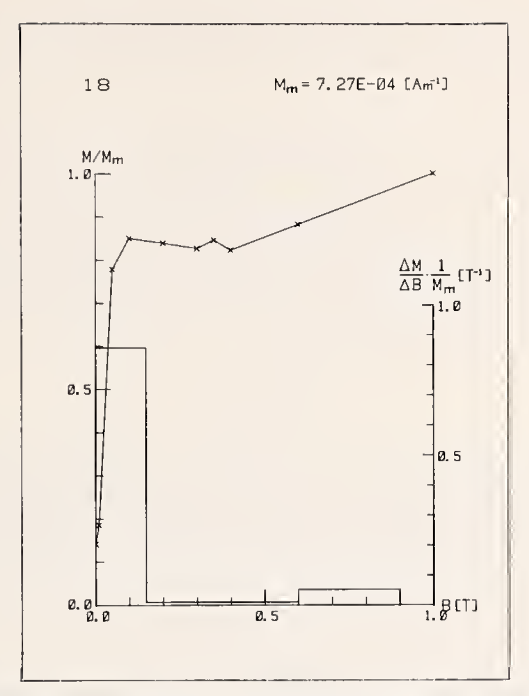


Abb. 3: IRM-Erwerbskurve von Probe 18 (*Clethrionomys*); vgl. Abb. 1.

findens, die vielleicht nicht immer, aber in der Mehrzahl der Fälle zu bekannten Plätzen im Gelände führte, wurde von den meisten folgenden Untersuchern auch festgestellt (Murie 1963, Mather & Baker 1981).

Diese Erklärungen mit der „route-based-navigation" bzw. den Leitlinien reichen aber nicht aus, und da im Laufe der Zeit der Erdmagnetismus bei den verschiedensten Tiergruppen als bestimmender Faktor der Navigation erkannt wurde, ergab sich dabei auch oft ein Zusammenhang mit dem Magnetit. Es war deshalb zu prüfen, ob unsere Kleinsäuger regelmäßig und in größeren Mengen Magnetit einlagern. Die im ersten Teil dieser Arbeit dargestellten Magnetitkurven zeigen nun also, daß bei allen 3 geprüften Arten (in 3 Gattungen) ein hoher Anteil an Magnetit vorliegt. Es kann also vielleicht damit gerechnet werden, daß bei weiteren Untersuchungen die physiologische Nutzung und der Sensor bei der Navigation unserer Kleinsäuger entdeckt und einwandfrei geklärt wird. Eine andere Frage ist es, ob dies bei allen Arten und immer im gleichen Maße der Fall ist, denn bei der Hausmaus läßt z. B. — trotz starken Magnetitgehalts (s. o.) — schon bei geringer Entfernung die Heimkehrtendenz nach (Lindenlaub 1960), und bei der Rötelmaus, die bekanntlich nicht rein nächtlich aktiv, sondern ein Dämmerungstier ist, könnte gegebenenfalls z. B. auch ein Sonnenkompaß, den man bei der Brandmaus entdeckte (Lüters & Birukow 1963), in Frage kommen. Auch bei der Kleinwühlmaus, die höchstwahrscheinlich (noch nicht geprüft) nur sehr kleine Aktionsräume hat und nicht weit wandert (Salvioni 1985), ist die Einlagerung von Magnetit als Notwendigkeit zum Navigieren kaum ersichtlich.

Vermutlich sind bei allen Kleinsäugern mehrere Hilfen zum Navigieren vorhanden, von denen der Magnetit einen wechselnden Stellenwert hat.

Zusammenfassung

Knochen- und Gewebeproben von den Nagern *Clethrionomys glareolus*, *Pitymys multiplex* und *Mus musculus* wurden mit Hilfe eines Kryomagnetometers auf das Mineral Magnetit getestet. Alle Proben enthielten Magnetit, die relativ höchsten Werte wurden bei *Pitymys* und *Mus* gefunden. Diese Ergebnisse werden im Zusammenhang mit verschiedenen Navigationstheorien diskutiert.

Summary

Bone and tissue samples of the rodents *Clethrionomys glareolus*, *Pitymys multiplex* and *Mus musculus* were tested for the presence of the mineral magnetite by use of a kryomagnetometer. All samples contained magnetite; high relative values were found in *Pitymys* and *Mus*. The results are discussed in the light of current navigation theories.

Literatur

Baker, R.R., J.G. Mather & J.H. Kennaugh (1983): Magnetic bones in human sinuses. — Nature 301 (5895): 78—80

Blakemore, R.P., R.B. Frankel & A.J. Kalmijn (1980): South-seeking magnetotactic bacteria in the Southern Hemisphere. — Nature 286: 384—385.

Krumsiek, K. (1980): Zur plattentektonischen Entwicklung des Indo-Iranischen Raumes (Resultate paläomagnetischer Untersuchungen in Afghanistan). — Geotekt. Forsch. 60 (I—II): 1—223.

Lehmann, E. von (1956): Heimfindeversuche mit kleinen Nagern. — Z. f. Tierpsychol. 13: 485—491.

Lindenlaub, E. (1960): Neue Befunde über die Anfangsorientierung von Mäusen. — Z. f. Tierpsychol. 17: 555—578.

Lowenstam, H.A. (1962): Magnetite in denticle capping in recent chitons (Polyplacophora). — Geol. Soc. Am. Bull. 73: 435—438.

Lüters, W. & G. Birukow (1963): Sonnenkompaßorientierung der Brandmaus (*Apodemus agrarius* Pall.). — Die Naturwissenschaften 50: 737—738.

Mather, J.G. & R.R. Baker (1981): Magnetic sense of direction in woodmice for route-based navigation. — Nature 291 (5811): 152—155.

Murie, M. (1963): Homing and orientation of deermice. — J. Mammalogy 44: 338—349

Salvioni, M. & A. Meylan (1985): Territorien und Aktivitätsrhythmen von drei Arten Wühlmäusen der Gattung *Pitymys* im Kanton Tessin (Schweiz). — Deutsche Ges. f. Säugetierkunde e. V., 59. Hauptversammlung in Hannover, 29. IX. bis 3. X. 1985. Kurzfassungen der Vorträge, pp. 59—60.

Walcott, Ch., J.L. Gould & J.L. Kirschvink (1979): Pigeons have magnets. — Science 205: 1027—1028.

Zoeger, J., J.R. Dunn & M. Fuller (1981): Magnetic material in the head of the Common Pacific Delphin. — Science 213: 892—894.

Prof. Dr. Klaus Krumsiek, Geologisches Institut der Universität zu Köln, Zülpicher Str. 49, D 5000 Köln 1. — Prof. Dr. Ernst von Lehmann, Im Wiesengrund 18, D 5305 Impekoven bei Bonn.